

# COMPORTAMIENTO DE VIVIENDAS DE FERROCEMENTO BAJO CARGAS CÍCLICAS

Daniel Bedoya Ruiz<sup>1\*</sup>  
David Álvarez Betancur<sup>2\*\*</sup>

Recibido: 31/08/2009

Aceptado: 05/10/2009

## RESUMEN

La escasez de vivienda en el mundo ha llevado desde hace varios años a la búsqueda de nuevos materiales y sistemas alternativos para su construcción. El ferrocemento desde hace más de 25 décadas viene siendo estudiado y aplicado como solución de vivienda en varios países; Colombia, uno de ellos. En este trabajo se presenta parte de los resultados de una investigación acerca del comportamiento de las viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas. Se probaron dos módulos de vivienda a escala real contruidos con paneles prefabricados de pared delgada de ferrocemento. Sobre cada módulo de ferrocemento se realizaron ensayos de carga cíclica y se evaluó su comportamiento. Los resultados obtenidos muestran la sensibilidad de este sistema estructural ante varios ciclos de carga, con pérdidas de rigidez cercanas al 20% para los primeros ciclos y hasta un 85% al final de los mismos.

**Palabras clave:** ferrocemento, viviendas, cargas cíclicas.

---

\* Doctor en Ingeniería Sismica y Dinámica Estructural, profesor Universidad de Medellín, Programa de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia, [dabedoya@udem.edu.co](mailto:dabedoya@udem.edu.co), 3405480

\*\* Estudiante Ingeniería, Civil, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

## **BEHAVIOR OF FERROCEMENT HOUSING UNDER CYCLICAL LOADS**

### **ABSTRACT**

The shortage of dwelling in the world has taken for several years to the search of new materials and alternative systems for its construction. For more than 25 decades, ferrocement has been studied and applied as a dwelling solution in several countries, among them Colombia.. This article refers to the results of a research about seismic behavior of ferrocement dwellings. Two modules built on real scale with prefabricated panels of ferrocement thin wall were used. On each module of ferrocement, tests of cyclical load were carried out, and its behavior was evaluated. The obtained results showed the sensitivity of this structural system under several cycles of load, with losses of rigidity near to 20% for the first cycles and up to 85% at the end of the same.

Keywords: ferrocement, dwelling, under cyclic loading.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los actuales retos sociales del mundo de la ingeniería y dentro de los planes de ordenamiento territorial de algunos países es la erradicación de barrios de tugurios y la mitigación de los impactos ambientales. En Colombia, se presenta un alto déficit de vivienda económica; la mayoría de las viviendas construidas se encuentran ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta y moderada, y algunas sin considerar normativas sismo resistentes y sin especificaciones técnicas, lo que las hace inseguras y vulnerables ante cualquier tipo de amenaza sísmica. En consecuencia, y dada la creciente demanda de vivienda de bajo costo, se hace necesario investigar nuevos materiales que permitan generar sistemas alternativos de vivienda viables, dignos, resistentes, económicos y sustentables [1], que pueda contribuir a la solución del déficit de vivienda.

El ferrocemento es un tipo de hormigón armado de pared delgada, habitualmente construido con mortero de cemento y reforzado con capas de malla de alambre continuas, de pequeño calibre y ocasionalmente barras de acero de armazón [2]. El mortero puede contener fibras discontinuas [3]. El ferrocemento se ha utilizado en algunas partes del mundo como una alternativa eficaz que, por una parte, ofrece viviendas durables y de buena resistencia, y, por otra parte, ofrece un sistema constructivo con base en mano de obra intensiva no calificada [4].

El ferrocemento posee buenas características dinámicas y ha mostrado ser un material con un gran potencial para aplicaciones vibratorias. Hajj [5] ha estudiado el comportamiento a flexión y cortante en losas de ferrocemento sujetas a cargas cíclicas en el plano y fuera del plano. Idealmente, el comportamiento fue elasto-plástico y presenta casi las mismas propiedades para la rigidez en los primeros ciclos de carga y antes de la primera grieta. Los elementos probados a flexión mostraron buena ductilidad y los niveles de esfuerzos permanecieron

esencialmente constantes hasta la falla [5]. En Colombia, [6-8] realizaron estudios de vulnerabilidad sísmica sobre las viviendas de ferrocemento en zonas de actividad sísmica moderada y alta. Los resultados obtenidos mostraron que, para estas zonas de actividad sísmica, la probabilidad del estado de daño leve es superior al 90% mientras que la suma de las probabilidades de los estados de daño moderado y severo es inferior al 5%. Adicionalmente, el modelo matemático para el ferrocemento es sencillo fácil y versátil.

Posteriormente, Bedoya et al. [9] realizaron ensayos sobre paneles tipo sándwich a base de material vegetal y ferrocemento. Se estudiaron tres tipos de material vegetal para el núcleo aligerado, viruta de madera, cascarilla de arroz y café, y papel reciclado. Todos los paneles presentaron buena resistencia a la flexión y capacidad de deflexión. El modo de fallo de la corteza de ferrocemento fue dúctil.

En este artículo se presentan los resultados del comportamiento sísmico de las viviendas de ferrocemento sometidas a carga cíclica.

## 1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 1.1 Descripción y construcción de los módulos

El sistema de vivienda prefabricada objeto de este estudio está compuesto por paneles de ferrocemento. Los paneles tienen 1.0 m de ancho por 2.0 m de altura y un espesor de 20 mm. Para la fabricación de todos los paneles se utilizaron los siguientes materiales: el mortero se elaboró con una arena para hormigón armado y un cemento Portland tipo I. Una relación arena-cemento de 1:2 y una relación agua-cemento de 0.40. Adicionalmente, se utilizó aditivo superplastificante al 1% del peso del cemento para mejorar la manejabilidad y penetrabilidad del mortero a través del refuerzo.

El refuerzo distribuido en la matriz cementante consistió en seis capas de malla hexagonal de  $1\frac{1}{4}$ " de abertura colocada longitudinalmente. Se construyeron dos módulos de ferrocemento. Estos módulos representan las edificaciones construidas con este material en diferentes partes del mundo. A continuación se describe cada uno de los módulos y el proceso constructivo.

### Descripción del módulo I

Los módulos de ferrocemento fueron contruidos en el Sistema de Reacción Espacial, SER, del laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y allí fueron probados. El primer módulo tiene una planta cuadrada de 3.0 m de lado y una altura de 2.0 m. En la figura 1a se muestra el esquema en 3D y la ubicación de los diferentes tipos de paredes y en la figura 1b el módulo construido.

La estructura de cubierta fue fabricada de tal manera que representara, en lo posible, un diafragma de cubierta semirrígido. La carga vertical usual en este tipo de viviendas se suministró por medio de un conjunto de sacos de arena colocados sobre el diafragma de cubierta.

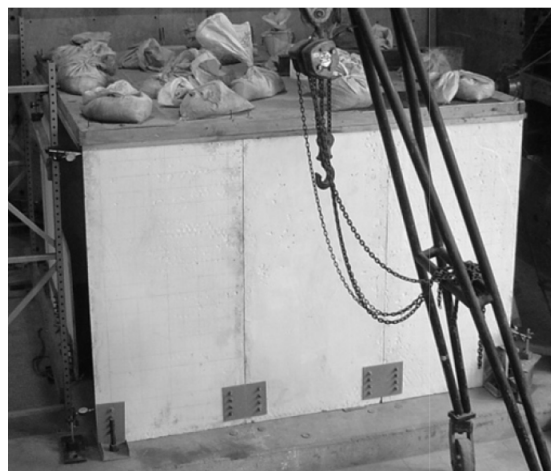
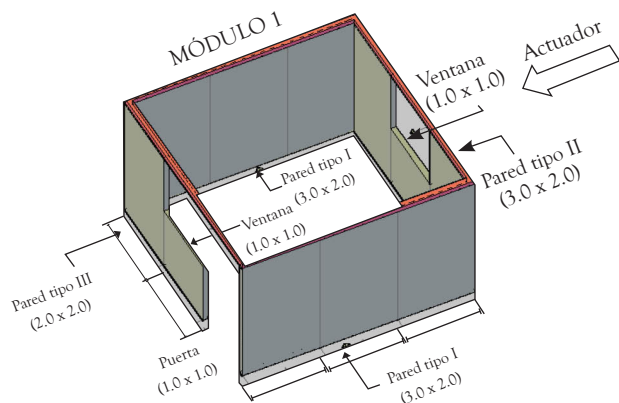
### Descripción del módulo II

Este módulo una planta igual al módulo I. En las figuras 2a y 2b se muestran las características de este módulo.

En la figura 2b, se muestra este módulo, con la estructura de cubierta y los sacos de arena para simular la carga gravitacional. Se puede observar la cubierta en madera adosada a las paredes de la vivienda por medio de las barras roscadas y tuercas.

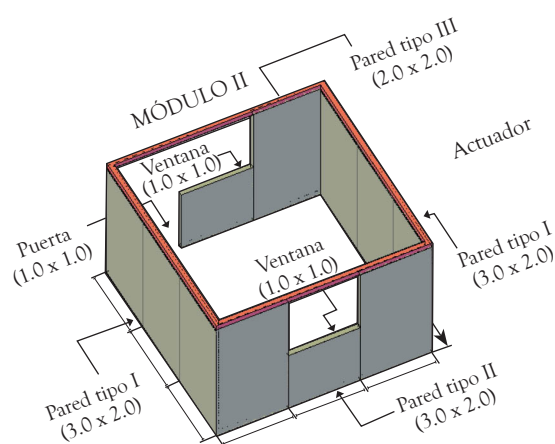
### 1.2 Instrumentación y ensayos de carga cíclica

En los módulos tridimensionales los desplazamientos se capturaron por medio de transductores mecánicos de desplazamiento con una precisión de 25.4 milésimas de milímetro ( $1/1000$ " ), según el tipo de módulo. Adicionalmente, se utilizó equipo de fotografía y video. En la figura 3a se esquematiza su ubicación. Cada desplazamiento horizontal a lo largo del borde superior se midió con tres transductores. Dos en las esquinas del módulo (A y C) y uno en el centro (B). En la parte inferior de las esquinas, se ubicaron dos transductores (D y E) para registrar los eventuales



**Figura 1.** Módulo I. (a) Esquema en 3D, (b) Módulo construido

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2.** Módulo II. (a) Esquema en 3D, (b) Módulo construido

Fuente: Elaboración propia

corrimientos del sistema de apoyo y en el extremo opuesto inferior se colocaron otros dos para registrar cualquier levantamiento vertical (F y G). A lado y lado de cada módulo se colocaron dos transductores para medir ladeos eventuales de la estructura (H y J).

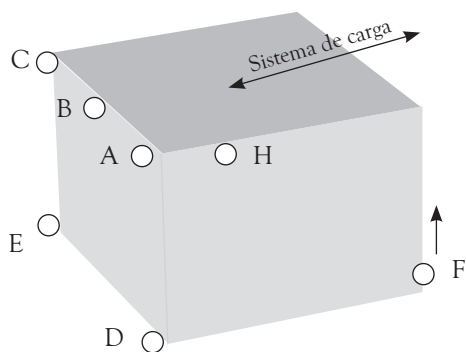
En la figura 3b se muestra la historia de carga utilizada. En todos los casos la carga fue aplicada de manera controlada mediante un actuador hidráulico con capacidad de 300 kN en el SER. La carga lateral cíclica fue aplicada en el centro del

módulo y transmitida a las paredes por medio de la estructura de cubierta.

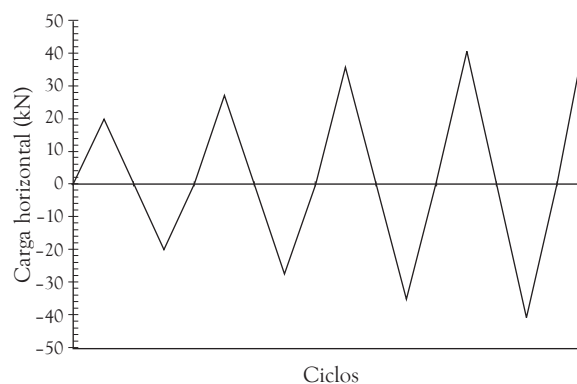
## 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

### 2.1 Comportamiento cíclico en módulos

Los módulos ensamblados con elementos prefabricados de ferrocemento fueron sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles en la direc-



(a)



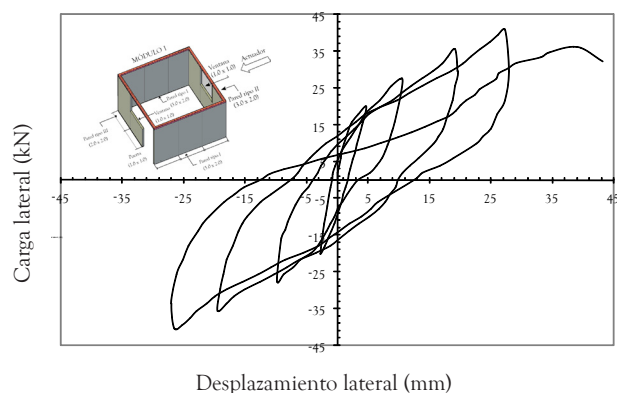
(b)

**Figura 3.** Esquema de la instrumentación en módulos

Fuente: Elaboración propia

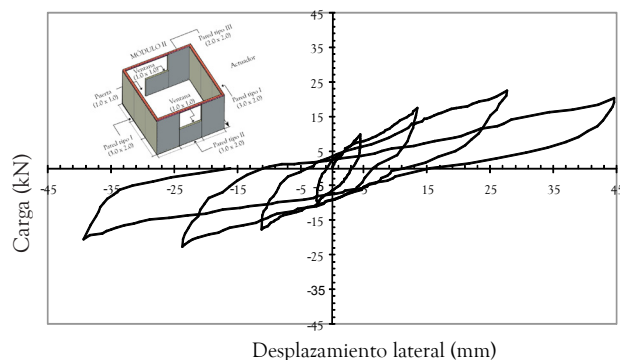
ción mostrada en la figura 3b. Este tipo de cargas simulan las acciones sísmicas. En las figuras 4 y 5 se muestra el comportamiento histerético o cíclico obtenido para el módulo I y el módulo II durante el ensayo de carga cíclica, respectivamente. En las histéresis exhibidas por los dos módulos se pueden observar algunas características comunes: aumento de los desplazamientos laterales con el incremento de las cargas cíclicas, una sustancial degradación de rigidez, un leve endurecimiento al final de cada lazo de la histéresis y capacidad para mantener la carga. En el módulo II, en particular, se observa esencialmente una mayor capacidad para el desplazamiento lateral, menor resistencia a las cargas impuestas y una reducción en el área de los lazos de histéresis con la acción cíclica.

La figura 6 muestra las relaciones carga-desplazamiento para los dos módulos ensayados. Estas relaciones fueron obtenidas como las envolventes del comportamiento histerético exhibido por cada uno de los módulos debido a la fuerza cíclica. La carga última para el módulo II es un 40% menor que la que le corresponde al módulo I. Al final de cada ciclo de histéresis se presenta un endurecimiento en el cual lleva a un aumento de la rigidez. Como se ha de esperar, la presencia de aberturas en las paredes disminuye la resistencia e incrementa los desplazamientos horizontales de las viviendas.



**Figura 4.** Comportamiento cíclico módulo I de ferrocemento.

Fuente: Elaboración propia



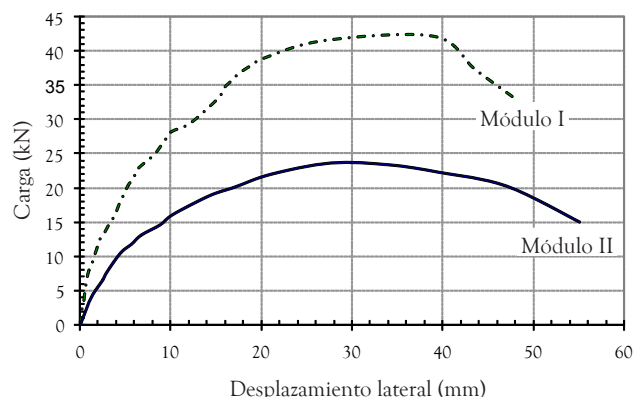
**Figura 5.** Comportamiento cíclico módulo II en ferrocemento.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1 se presenta el valor de la carga última, el desplazamiento máximo lateral y algunos parámetros estructurales para cada uno de los módulos, tales como la rigidez tangente inicial y la rigidez tangente final.

## 2.2 Degradación de resistencia y rigidez

A partir de las curvas de histéresis obtenidas para cada uno de los módulos se analizó la degradación de rigidez y la pérdida de resistencia del sistema estructural prefabricado de ferrocemento, sometido a los diferentes ciclos de cargas. La forma de los lazos de histéresis presenta una variación de la pendiente de un ciclo a otro, lo cual indica que el sistema experimenta una degradación de rigidez. Sin embargo, es necesario cuantificar cuál es la pérdida real de rigidez. Para ello, se calculó la rigidez secante en cada ciclo. La rigidez secante  $k_i$  se definió como la relación entre la carga alcanzada en un ciclo y su respectivo desplazamiento desde el inicio del ciclo. Para correlacionar los resultados de los ensayos se determinó la rigidez elástica equivalente o la rigidez tangente inicial  $k_e$ , la cual fue hallada por medio de una regresión lineal desde el origen hasta el punto en el cual se observa la pérdida de linealidad de la curva carga-desplazamiento del primer ciclo de carga (o aparición de la “primera



**Figura 6.** Envolturas de carga lateral de los módulos de ferrocemento.

Fuente: Elaboración propia

grieta estructural”). La pérdida de rigidez también fue comparada con la deriva de piso, es decir, la relación de los desplazamientos horizontales generados por la carga del actuador y la altura de la edificación  $h$  ( $h=2.0$  m, en nuestro caso). La tabla 2 presenta los resultados de los desplazamientos máximos  $d_{\max}$ , la deriva de piso  $\delta$ , la degradación y el porcentaje de la pérdida de la rigidez obtenida en cada ciclo de carga respecto a la rigidez tangente inicial para ambos módulos. La pérdida de rigidez se ha tomado con respecto a la rigidez tangente inicial en los respectivos ciclos de carga.

La degradación de rigidez observada es considerable, aproximadamente un 25% en el primer ciclo

**Tabla 1.** Resistencia, desplazamiento y rigidez de módulos de ferrocemento.

| Módulo I | Carga última lateral | Desplamiento máximo | Rigidez tangente inicial | Rigidez tangente inicial |
|----------|----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
|          | (kN)                 | (mm)                | (kN/mm)                  | (kN/mm)                  |
| I        | 42,17                | 48                  | 5,7                      | 1,13                     |
| II       | 23,66                | 55                  | 2,76                     | 0,37                     |

Fuente: Elaboración propia

y aumenta hasta un 82.56% al final de las cargas reversibles en el caso del módulo I. La función de la degradación de rigidez, es decir, la relación entre las rigideces y el desplazamiento de los sistemas estructurales de las viviendas es similar en los dos casos. La ecuación 1 se propuso para correlacionar la rigidez de los módulos y los desplazamientos del sistema.

$$\frac{k_i}{k_e} = \alpha \left( \frac{d_{\max}}{h} \right)^\beta \quad (1)$$

Donde,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la degradación de rigidez.  $\alpha$  y  $\beta$  fueron obtenidos por medio de un análisis de regresión sobre las curvas

**Tabla 2.** Deterioro de la resistencia de los módulos ante cargas cíclicas.

| Ciclo | Módulo I         |                |               |           |                    | Módulo II        |                |               |           |                    |
|-------|------------------|----------------|---------------|-----------|--------------------|------------------|----------------|---------------|-----------|--------------------|
|       | $d_{\max}$ ciclo | Deriva de piso | Rigidez $k_i$ | $k_i/k_e$ | Pérdida de rigidez | $d_{\max}$ ciclo | Deriva de piso | Rigidez $k_i$ | $k_i/k_e$ | Pérdida de rigidez |
|       | (mm)             | (mm/mm)        | (kN/mm)       |           | (%)                | (mm)             | (mm/mm)        | (kN/mm)       |           | (%)                |
|       | 2,42             | 0,0012         | 5,70          | 1,00      | 0,00               | 2,90             | 0,0015         | 2,78          | 1,00      | 0,00               |
| 1     | 4,74             | 0,0024         | 4,22          | 0,74      | 25,98              | 4,45             | 0,0022         | 2,25          | 0,81      | 19,13              |
| 2     | 12,07            | 0,0060         | 2,46          | 0,43      | 56,91              | 15,43            | 0,0077         | 1,29          | 0,47      | 53,48              |
| 3     | 19,16            | 0,0096         | 1,54          | 0,27      | 72,94              | 27,61            | 0,0138         | 0,71          | 0,26      | 74,36              |
| 4     | 27,33            | 0,0137         | 0,99          | 0,17      | 82,56              | 44,58            | 0,0223         | 0,37          | 0,13      | 86,77              |

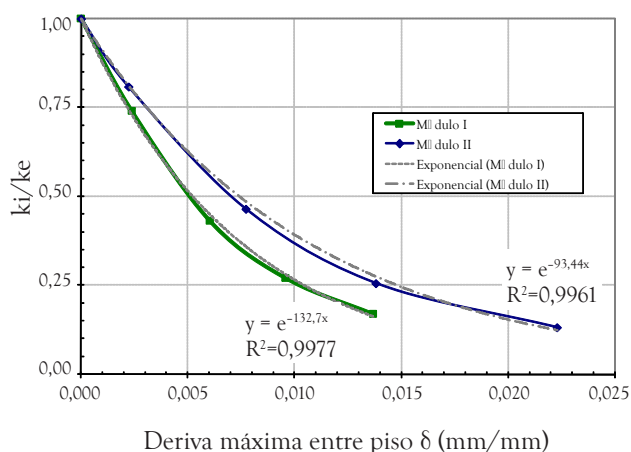
Fuente: Elaboración propia



experimentales. La figura 7 muestra la relación  $k_i/k_e - d_{max}/h$  para ambos módulos.

Para el módulo I, la ecuación propuesta se ajusta un 99.77% a los datos experimentales, en cambio para el módulo II, el ajuste es un poco menor (99.66%). Para ambos módulos el parámetro  $\alpha = 1.0$ . Para el módulo I,  $\beta = -132.68$  y para el módulo II  $\beta = -93.436$ . La función para la relación de rigideces y la deriva se ajustan bien como medida de la degradación de rigidez que exhiben los sistemas estructurales de ferrocemento. Adicionalmente, se observa un considerable deterioro de la rigidez de estos sistemas bajo acciones cíclicas. De acuerdo con la figura 7 y la tabla 1, la rigidez sigue una línea descendente hasta alcanzar un valor de 1.13 kN/mm, para el módulo I y de 0.37 kN/mm, para el módulo II. En este punto los sistemas poseen sólo un 20% de su rigidez y dejan de soportar carga. Las curvas descendentes de la respuesta de degradación de rigidez de cada uno de los módulos con la deriva (ver figura 7) sugieren una franja estrecha para la pérdida de rigidez, lo que resalta la sensibilidad y escasa diferencia entre los sistemas.

La similitud entre los porcentajes de pérdida de rigidez para cada uno de los módulos muestra la sensibilidad de las viviendas a cargas cíclicas o a eventuales sismos durante su vida útil. Para los dos módulos probados, el incremento en los desplazamientos horizontales generó pérdidas de rigidez por encima del 80% de la rigidez inicial. Así, en el primer ciclo de carga el módulo I pierde el 26%, y el módulo II, el 19%. En el segundo ciclo la pérdida de rigidez con respecto a la rigidez inicial es del 57% para el módulo I, y 53% para el módulo II. En el tercer ciclo las pérdidas se hacen más notorias y ambos módulos han perdido en promedio un 73 y 74% de su rigidez inicial. En los últimos ciclos, y aunque hay una leve tendencia a estabilizarse, los dos sistemas estructurales alcanzan pérdidas del 83% y el 87%, respectivamente. La similitud presentada por ambos módulos en la degradación de rigidez demuestra la sensibilidad de los dos sistemas estructurales de



**Figura 7.** Degradación de rigidez por cargas cíclicas en viviendas de ferrocemento.

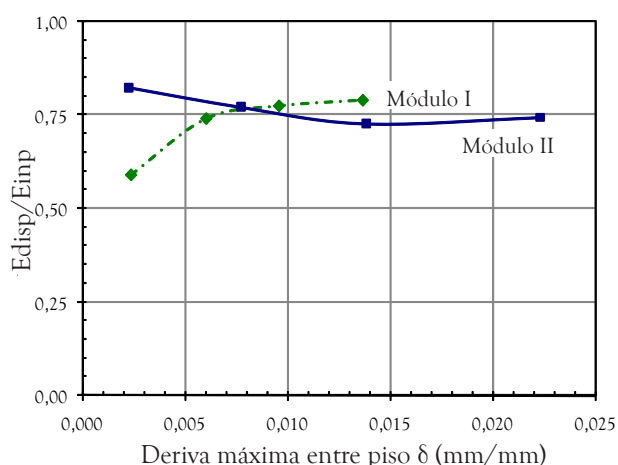
Fuente: Elaboración propia

ferrocemento a cargas cíclicas y pone de manifiesto la tendencia al deterioro de la rigidez sin importar la configuración de los mismos y la capacidad de carga. Adicionalmente, la respuesta de degradación debido a las cargas cíclicas es prácticamente independiente de la resistencia, la deformabilidad y la amplitud de los lazos de histéresis. Por otra parte y en este caso, sólo se observó una pérdida de resistencia al final del ensayo.

### 2.3 Energía disipada y energía acumulada

Como una medida de la capacidad de disipación de energía para un desplazamiento dado, se calculó la energía de entrada y la energía histerética disipada. La energía de entrada  $E_{inp}$  se define como el trabajo del actuador necesario para deformar el espécimen desde el inicio del ensayo hasta un desplazamiento determinado. El trabajo del actuador necesario para deformar el sistema estructural—empujar o halar el módulo hasta un desplazamiento máximo en un ciclo de carga  $\Delta E_{inp}$ —se calcula mediante la suma de las áreas bajo las partes positiva y negativa de los lazos de la histéresis, respectivamente. La cantidad de energía disipada  $E_{disp}$ , para un ciclo de carga, se define y se calcula a partir del área contenida en el lazo de histéresis entre dos desplazamientos pico,





**Figura 8.** Relación de energías con la deriva de piso.

Fuente: Elaboración propia

consecutivos. El área encerrada por los ciclos de histéresis carga-desplazamiento medidos en los módulos prefabricados de ferrocemento sugiere una capacidad aceptable de disipación de energía. La tabla 3 presenta los desplazamientos máximos  $d_{max}$ , la deriva  $\delta$  de piso, la energía de entrada, la energía disipada y los valores de la relación entre estas últimas, para los dos módulos ensayados bajo cargas cíclicas.

El módulo I, en el primer ciclo, disipó el 59% y continúa disipando energía en los ciclos restantes hasta alcanzar un 79%. El módulo II, en el primer ciclo, disipa el 82% de la energía de entrada y en los demás ciclos se estabiliza en un promedio del 74%. La figura 8 muestra la relación entre la  $E_{disp}/E_{inp}$  con la deriva de piso.

A pesar de que los ensayos en ambos sistemas estructurales se realizaron bajo condiciones similares de carga, existe una diferencia notable en el módulo II. El área encerrada por los lazos de histéresis es más reducida; esto se puede observar calculando las respectivas energías (ver tabla 3). Sin embargo, las relaciones entre la energía disipada y la energía de entrada son similares para ambos módulos, lo que puede significar una independencia entre las configuraciones estructurales de ferrocemento

para disipar energía, aunque es claro que la poca amplitud de los lazos de histéresis del módulo II implica menos capacidad de disipación. Ambos módulos de ferrocemento disiparon más del 70% de la energía de entrada y exhibieron mejores capacidades de disipación de energía que algunos sistemas construidos con materiales convencionales sometidos a cargas similares [10].

### 3. CONCLUSIONES

Las pruebas tenían el propósito de simular la acción sísmica. Los módulos presentaron buena capacidad para resistir cargas cíclicas. El comportamiento característico exhibido por las viviendas de ferrocemento fue a flexión. Los módulos mostraron deterioro de rigidez; las pérdidas de rigidez fueron del orden del 20% para los primeros ciclos y hasta un 85% al final. El modo de fallo observado durante las pruebas consistió en la formación de un mecanismo de colapso con articulaciones plásticas alrededor de las zonas de conexión estructura-cimentación y estructura-cubierta, principalmente en las conexiones de cubierta; esta situación se produjo para valores de carga cercanos a 42 kN. En general, los sistemas estructurales prefabricados de ferrocemento presentaron adecuada capacidad para disipar energía. En general, los módulos de ferrocemento presentaron una adecuada capacidad para disipar energía; estos exhibieron mejores características de disipación de energía que algunos sistemas construidos con materiales convencionales.

### 4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación hace parte del proyecto: Generación y comportamiento sísmico de viviendas de ferrocemento. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones, al CEIN y al programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín, por su apoyo y financiación.

## REFERENCIAS

- [1] D. Bedoya. "Casas de Ferrocemento; Viviendas de ferrocemento y afines," julio 28, 2009; <http://casasde-ferrocemento.blogspot.com>.
- [2] A. E. Naaman, *Ferrocement and laminated cementitious composites*, Michigan: Techno Press 3000, 2000.
- [3] A. E. Naaman, and P. Guerrero, "Bending behavior of hybrid ferrocement composites reinforced with PVA meshes and PVA fibers," in *Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement*, University of Michigan, Ann Arbor, June, 1998, pp. 361-374.
- [4] D. Bedoya, "Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas de viviendas de bajo costo estructuradas con ferrocemento," Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
- [5] N. M. Hajj, "Shear Behavior of ferrocement plates subjected to in plane cyclic loads," University of New York, Buffalo, 1981.
- [6] D. Bedoya, J. Hurtado, and L. Pujades, "Experimental and analytical research on seismic vulnerability of lowcost ferrocement dwelling houses," *Journal of Structure and Infrastructure Engineering (SIE) Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, LifeCycle Design and Performance*, 2008].
- [7] D. Bedoya, J. Hurtado, and L. Pujades, "Hysteretic model and seismic vulnerability of ferrocement houses," in *14th world conference on earthquake engineering (14WCEE)*, Beijing, October 12-17, 2008.
- [8] D. Bedoya, "Aplicación del modelo de Bouc y Wen en el diseño sísmico de viviendas prefabricadas," *Nuevas tendencias en el diseño de materiales y estructuras*, D. Bedoya, ed., Medellín: Sello Editorial Universidad de Medellín, 2008.
- [9] D. Bedoya, J. Aldana, and L. Ávila, "Materiales compuestos a base de ferrocemento y material vegetal," *Nuevas tendencias en el diseño de materiales y estructuras*, D. Bedoya, ed., Medellín: Sello Editorial Universidad de Medellín, 2008.
- [10] C. Sittipunt, S. L. Wood, P. Lukkunaprasit *et al.*, "Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls with Diagonal Web Reinforcement," *ACI Structural Journal*, vol. 98, no. 4, pp. 554-562, 2001.